

## REVIEW

# BIOLOŠKI UČINCI NEIONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA: ELEKTROMAGNETSKA POLJA IZRAZITO NISKIH FREKVENCIJA

IVANA BUŠLJETA, MILICA GOMZI I  
IVANČICA TROŠIĆ

*Institut za medicinska istraživanja i  
medicinu rada, Zagreb*

Primljeno siječanj 2000.

Prije stotinu godina izloženost ljudi elektromagnetskim poljima bila je ograničena na prirodna polja podrijetlom iz Zemlje i svemira. Posljednjih pedesetak godina velik je porast izloženosti umjetnim izvorima ovakvih polja, osobito onima frekvencije 50 i 60 Hz (frekvencija električnog napajanja). Elektromagnetska polja izrazito niskih frekvencija ili ELF-polja (engl. *extremely low frequency* – ELF) pripadaju dijelu spektra neionizirajućeg elektromagnetskog zračenja frekvencije manje od 300 Hz. Posljednjih dvadeset godina intenzivno se provode epidemiološka i laboratorijska istraživanja bioloških učinaka ELF-polja. Rezultati pojedinih epidemioloških istraživanja upućuju na njihovu povezanost s pojavom leukemije i tumora mozga u djece i odraslih, kao i s pojavom karcinoma dojke u profesionalno izloženoj populaciji, ali ti rezultati nisu nedvojbeno potvrđeni na pokusnim životinjama. Osim istraživanja karcinogenog potencijala ELF-polja, sve su brojnija i istraživanja njihove moguće uloge u etiopatogenezi neurodegenerativnih bolesti, kardiovaskularnih poremećaja, psihičkih smetnji i fenomena »elektrosenzitivnosti«.

*Ključne riječi:*

ELF-polja, epidemiološka istraživanja, laboratorijska istraživanja, opća izloženost, profesionalna izloženost

Intenzivan razvoj i sveobuhvatna primjena novih tehnologija uzrokovali su porast opće i profesionalne izloženosti izvorima elektromagnetskih zračenja izrazito niskih frekvencija (engl. *extremely low frequency* – ELF).

Elektromagnetska zračenja izrazito niskih frekvencija su neionizirajuća zračenja (tablica 1.). Prema definiciji Međunarodnog društva za zaštitu od zračenja (*International Radiation Protection Association* – IRPA) neionizirajuće zračenje je dio spektra elektromagnetskog zračenja koji u primarnoj interakciji s tkivima ne ionizira atome i molekule (1).

Nije poznat točan mehanizam interakcije električne i magnetske komponente zračenja izrazito niskih frekvencija s biološkim sustavom. Teorije o mogućim meha-

nizmima interakcije su: teorija o akceleraciji iona i polariziranih molekula proteina s posljedičnim promjenama na staničnoj membrani i proteinskim receptorima, teorija magnetita, teorija reakcije slobodnih radikala, teorija rezonancije i ostale (2, 3). Najprihvaćenija je teorija indukcije električne struje i električnog polja unutar izloženog tkiva.

Nepoznavanje mehanizma djelovanja dovodi do mnogobrojnih pitanja vezanih uz pojavu bioloških učinaka ELF-polja, kao i njihovu štetnost za zdravlje izloženih osoba. Biološki učinak je svaka promjena u biološkom sustavu pri izloženosti stresu. Ako intenzitet ili duljina izloženosti stresu nadmaše kompenzacijske sposobnosti izloženog organizma, razvija se promjena štetna za zdravlje (4).

Cilj je današnjih multidisciplinarnih istraživanja utvrđivanje bioloških učinaka pojedinih frekvencijskih pojasa elektromagnetskog spektra i njihova mogućeg učinka na zdravlje, kao i utvrđivanje bitnih biofizikalnih odrednica koje određuju stupanj i narav bioučinkovitosti elektromagnetskih polja. U tu svrhu provode se mnogobrojna epidemiološka istraživanja na profesionalno i rezidencijalno izloženim skupinama te istraživanja na dobrovoljcima, životinjama i sustavima *in vitro*. Dobiveni rezultati pružaju podlogu za definiranje granica dopustive izloženosti opće i profesionalne populacije izvorima ELF-polja.

Nedosljednost u primjeni metodologije i nereproducibilnost rezultata pojedinih istraživanja samo su neki od razloga zbog kojih se pojavila potreba za sistematizacijom i usklađivanjem na međunarodnom nivou – od planiranja, do izvedbe istraživanja i interpretacije dobivenih rezultata. S tom svrhom organiziran je niz multidisciplinarnih projekata kao što su »International EMF Project« pod pokroviteljstvom Svjetske zdravstvene organizacije (5) i »Biomedical effects of electromagnetic fields« u okviru COST 244–*European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research* (6). Sredinom 1999. godine u Sjedinjenim Američkim Državama dovršen je dugogodišnji nacionalni projekt istraživanja bioloških učinaka ELF-polja pod nazivom *Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination Program – EMF RAPID* (3) čije je provođenje uz državu financirala i elektrodistribucijska industrija. Valja istaknuti da financiranje istraživanja od strane zainteresiranih industrija može potaknuti sumnju u vjerodostojnost objavljenih rezultata.

Svrha ovog teksta je pregled dosadašnjih istraživanja biološkog potencijala zračenja izrazito niskih frekvencija u uvjetima opće i profesionalne izloženosti različitim ELF izvorima te postojećih standarda i mjera zaštite.

Tablica 1. Vrste elektromagnetskog zračenja (1)

Vrsta zračenja	Frekvencija (Hz)	Valna duljina (m)	Energija (eV)
Neonizirajuća zračenja			
statičko polje	0	$\infty$	0
zračenja izrazito niskih frekvencija	>0–300	$>10^3$	$<1,24 \times 10^{-12}$
radiofrekventna zračenja	$>300–3 \times 10^{11}$	$>10^{-3}–10^3$	$\geq 1,24 \times 10^{-12}–1,24 \times 10^{-3}$
optička zračenja	$>3 \times 10^{11}–3 \times 10^{15}$	$>10^{-7}–10^{-3}$	$>1,24 \times 10^{-3}–12,40$
Ionizirajuća zračenja	$>3 \times 10^{15}$	$\leq 10^{-7}$	$>12,40$

## FIZIKALNE VELIČINE I MJERNE JEDINICE

Elektromagnetsko zračenje je tijek energije ili materije uzrokovan emisijom čestica ili EM (elektromagnetskih) valova iz određenog izvora. Elektromagnetski val sastoji se od električne ( $\vec{E}$ ) i magnetske komponente ( $\vec{H}$ ) koje se poput periodičnog poremećaja šire kroz prostor. U tablici 2. kratak je prikaz fizikalnih veličina i mjernih jedinica kojima definiramo fizikalna svojstva EM zračenja.

Tablica 2. *Fizikalne veličine, oznake i mjerne jedinice relevantne za definiranje elektromagnetskih fenomena (7)*

Fizikalna veličina	Oznaka	Mjerna jedinica
permitivnost	$\epsilon$	farad po metru [F/m]
permitivnost vakuumu	$\epsilon_0$	$\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12}$ F/m
permeabilnost	$\mu$	henry po metru [H/m]
permeabilnost vakuumu	$\mu_0$	$\mu_0=1,257 \times 10^{-6}$ H/m
frekvencija	$f$	hertz [Hz]
valna duljina	$\lambda$	metar [m]
jakost električnog polja	$\vec{E}$	volt po metru [V/m]
jakost magnetskog polja	$\vec{H}$	amper po metru [A/m]
gustoća magnetskog toka ili magnetska indukcija	B	tesla [T] ili gauss [G]
gustoća električne struje	J	amper po metru kvadratnom [A/m <sup>2</sup> ]
električna provodljivost	$\sigma$	siemens po metru [S/m]
impedancija	Z	ohm [ $\Omega$ ]

## IZVORI ZRAČENJA IZRAZITO NISKIH FREKVENCIJA

Zračenja izrazito niskih frekvencija obuhvaćaju frekvencijski raspon iznad 0 Hz do 300 Hz. Izvori ovakva zračenja uglavnom su vezani uz proizvodnju, distribuciju i uporabu električne energije. Frekvencija izmjenične električne struje u elektroenergetskim sustavima većine zemalja iznosi 50 Hz, a u Sjevernoj Americi 60 Hz. Elektromagnetska zračenja navedenih frekvencija izrazito su velike valne duljine: 6000 km pri 50 Hz i 5000 km pri 60 Hz.

Oko svakog pozitivno ili negativno nabijenog tijela postoji električno polje. Jakost tog polja proporcionalna je električnom naponu između dviju točaka u električnom polju. Kada kroz vodič poteče električna struja, oko njega se stvara magnetsko polje, čija je jakost razmjerna jakosti električne struje.

Izloženost zračenju koje emitiraju umjetni izvori često je mnogostruko veća od izloženosti zračenju prirodnih izvora. Većina prirodnih izvora zračenja stvara ELF-polje veličine oko  $10^{-4}$  V/m i  $10^{-13}$  T (3, 7). Munje izazivaju električno pražnjenje u donjem dijelu atmosfere pri čemu se na tlu može izmjeriti električno polje jakosti 130 V/m i magnetsko polje veličine oko  $0,5 \mu\text{T}$ . Polja jakosti oko 50 kV/m pojavljuju se neposredno ispod munja. Magnetsko polje nastalo zbog električnog protoka unutar Zemljine užarene jezgre iznosi oko  $50 \mu\text{T}$ .

Prema uporabi umjetni izvori ELF-polja dijele se na:

□ opće izvore, npr. elektrane za proizvodnju električne energije, rasklopna postrojenja za razvod i transformaciju električne energije, vodovi za prijenos i razdiobu električne energije,

□ izvore u domaćinstvu, npr. različiti električni uređaji, unutarnji i vanjski električni vodovi,

□ izvore na radnome mjestu, npr. električni uređaji i vodovi u elektroprivredi, uređaji za elektrolizu u industriji, indukcijske peći, uređaji u procesu zavarivanja i taljenja, transportni sustavi te svi ostali oblici uporabe električne energije u industriji, medicini, znanstvenoistraživačkoj djelatnosti i za komercijalne svrhe.

Vrijednosti magnetske indukcije ELF-polja oko pojedinih umjetnih izvora prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti magnetske indukcije umjetnih izvora zračenja frekvencije 50/60 (7)

Izvori zračenja	Magnetska indukcija (mT)	
	prosječna vrijednost	najveća vrijednost
<i>Elektrodistribucija:</i>		
– visokonaponski dalekovodi (380 i 765 kV)	0,01 – 0,03	0,4 (u slučaju kvara)
– podstanice	0,02 – 0,04	0,27
<i>Domaćinstvo i uredi:</i>		
– uobičajeni električni uređaji u domaćinstvu	$10^{-5}$ – $10^{-3}$	$10^{-3}$ – $4 \times 10^{-2}$
– električne grijalice	$1,2 \times 10^{-2}$ (udaljenost 30 cm)	–
<i>Industrija i medicina:</i>		
– elektrolitički procesi	1 – 10	50
– uređaji za taljenje metala	0,1 – 5,8	130
– indukcijski grijači	1 – 6	25
– elektrolučno zavarivanje	do 1	–
– uređaji za fizikalnu terapiju	1 – 16	–

## BIOFIZIKALNI MEHANIZMI INTERAKCIJE ZRAČENJA IZRAZITO NISKIH FREKVENCIJA I BIOLOŠKIH SUSTAVA

Električno polje neposredno inducira promjenu električnog naboja na površini izloženog tijela uz pojavu električne struje unutar tijela. Gustoća inducirane električne struje u tkivima proporcionalna je frekvenciji sinusoidalnog električnog polja.

Inducirajući pojavu električnog polja, magnetsko polje uzrokuje električnu struju unutar tkiva. Gustoća ove struje u tkivima ovisi o frekvenciji magnetskog polja, gustoći magnetskog toka, električnoj provodljivosti tkiva i polumjeru induktivne zavojnice.

Istraživanja su pokazala da gustoća električne struje u tkivu manja od  $1 \text{ mA/m}^2$  nema bioloških učinaka (tablica 4.). Potrebno je napomenuti da se unutar organizma u tijeku fizioloških procesa oslobađa električna struja čija je gustoća u rasponu od 1 do  $10 \text{ mA/m}^2$ .

Tablica 4. Vrijednosti jakosti električnog polja, magnetske indukcije i gustoće električne struje unutar tkiva s pripadajućim učincima pri neposrednom izlaganju trupa izvorima zračenja frekvencije 50/60 (7)

Jakost električnog polja (kV/m)	Magnetska indukcija (mT)	Gustoća električne struje (mA/m <sup>2</sup> )	Učinak
<3	<0,06	<1	bez učinka
3 – 30	0,06 – 0,6	1 – 10	zanemarivi biološki učinci
30 – 300	0,6 – 6	10 – 100	magnetofosfeni; moguće promjene u aktivnosti CNS-a; promjene u staničnom metabolizmu; indukcija cijeljenja frakture kostiju
>300	6 – 60	100 – 1000	promjene u aktivnosti CNS-a; promjene u staničnom metabolizmu; mogući štetni učinci
	>60	>1000	direktna stimulacija mišića i perifernih živaca; moguće ekstrasistole i ventrikularna fibrilacija; utvrđeni štetni učinci

## EPIDEMIOLOŠKA ISTRAŽIVANJA O NEPOSREDNIM UČINCIMA ZRAČENJA IZRAZITO NISKIH FREKVENCIJA

### Rezidencijalna izloženost

Wertheimer i Leeper su 1979. godine utvrdili povezanost blizine dalekovoda u mjestima stanovanja s pojavom karcinoma u djece (8). U istraživanjima koja su zaredala (9–22) ispitivao se karcinogeni učinak magnetske komponente ELF-polja oko visokonaponskih električnih vodova na izrazito vulnerabilnu populaciju kao što su djeca. Pritom je razina izloženosti utvrđena na dva načina – izravnim mjerenjima magnetske komponente ELF-polja ili putem proračuna. Još postoje nedoumice u interpretaciji rezultata navedenih epidemioloških istraživanja s obzirom na malobrojni uzorak, neodgovarajuću kontrolnu skupinu i valjanost ekspozimetrije. Od ukupno petnaest završenih istraživanja, rezultati njih pet pokazuju statistički značajnu povezanost pojave leukemije u djece i rezidencijalne izloženosti ELF-polju (8, 13, 16, 20, 21). Postoji i mišljenje da stanovanje u blizini dalekovoda uzrokuje povećanu incidenciju leukemije u djece interakcijom s nekim nepoznatim faktorom rizika. U novijim istraživanjima Michaelisa i suradnika (20) i Lineta i suradnika (21) broj ispitanika je veći, mjerenja zračenja *in situ* dugotrajna su i kontinuirana, a obrada podataka je poboljšana. Njihovi rezultati potvrđuju povezanost izloženosti ELF-polju gustoće magnetskog toka iznad 0,2  $\mu$ T s pojavom leukemije u djece. Dva istraživanja upućuju na statistički značajnu povezanost stanovanja u blizini električnih dalekovoda i pojave drugih oblika karcinoma (8, 11). Rezultati Tomeniusa (10) i Verkasaloa i suradnika (18) govore u prilog značajno povećanom riziku od pojave tumora mozga u takvim uvjetima.

Osim utjecaja blizine dalekovoda u mjestima stanovanja na zdravlje, provedena su i istraživanja o povezanosti primjene različitih električnih uređaja u domaćinstvu i

pojave karcinoma u djece, ponajprije leukemije i tumora mozga. Rezultati su uglavnom negativni (23). Izuzetak je istraživanje *Savitza i suradnika* o pojavi malignoma pri visokoj prenatalnoj i postnatalnoj izloženosti ELF-polju uporabom električnog pokrivača (24). *London i suradnici* (14) dobili su potvrdne rezultate o povezanosti uporabe sušila za kosu i gledanja crno-bijelog televizora s pojavom karcinoma u djece.

Sve su brojnija istraživanja kojima se ispituje pojava karcinoma u odrasloj populaciji pri rezidencijalnoj izloženosti ELF-polju vezanom uz elektrodistribucijsku mrežu (13, 25–32). U jednom od osam provedenih istraživanja nađena je statistički značajna povezanost pojave karcinoma različitih sijela i ovakve izloženosti (25). *McDowall i suradnici* našli su povezanost s karcinomom pluća (26), a *Feychting i Ahlbom* upozoravaju na povećanu pojavu akutne i kronične mijeloične leukemije (31). U tijeku je nekoliko velikih istraživanja u Sjedinjenim Američkim Državama i drugim zemljama o riziku obolijevanja od karcinoma dojke u žena izloženih ELF-polju. Ovim se žele potvrditi rezultati laboratorijskih istraživanja o utjecaju EM zračenja izrazito niskih frekvencija na pad koncentracije melatonina u krvotoku, s posljedičnim učinkom na pojavu karcinoma dojke.

Završena istraživanja o karcinogenom učinku ELF-polja pri uporabi različitih električnih uređaja u domaćinstvu (npr. električni pokrivač, sušilo za kosu, električni aparat za brijanje) ne upućuju na povezanost s pojavom karcinoma dojke u žena (33, 34), leukemije u odraslih (35, 36) i karcinoma testisa (37).

Uz već nabrojene teškoće pri interpretaciji rezultata epidemioloških istraživanja o učincima ELF-polja na zdravlje djece, u ispitanika odrasle dobi dodatni otežavajući čimbenik je i nedovoljno poznavanje izloženosti izvorima zračenja na radnome mjestu.

### Profesionalna izloženost

Sovjetski su autori *Asanova i Rakov* (38), uz *Sazanovu* (39), šezdesetih godina utvrdili raznovrsne zdravstvene smetnje u radnika zaposlenih u održavanju visokonaponske elektrodistribucijske mreže. *Milham* je 1982. godine proveo istraživanje o pojavi karcinoma u električara i osoba sličnih zanimanja. Istraživanje se temeljilo na podacima o uzroku smrti i na gruboj procjeni izloženosti izvorima zračenja izrazito niskih frekvencija na radnome mjestu, a dobiveni rezultati pokazivali su povećan rizik od pojave leukemije (40). Različiti su rezultati istraživanja o učestalosti profesionalnih leukemija (41, 42), tumora mozga (43, 44) i karcinoma dojke kod muškaraca (45–50) i žena (50, 51).

Četiri novija istraživanja nastojala su umanjiti nedostatke ranijih uključivanjem velikog broja ispitanika, mjerenjem ELF-polja na radnome mjestu i podacima o trajanju izloženosti u tijeku radnog vremena (52–55). Međutim, njihovi rezultati nisu ništa manje proturječni. Kalifornijskim istraživanjem (52) nije dokazan karcinogeni potencijal ELF-polja. *Floderus i suradnici* (53) našli su da izloženost ELF-polju gustoće magnetskog toka iznad  $0,20 \mu\text{T}$  u trajanju duljem od 29% dnevnoga radnog vremena, podvostručuje incidenciju kronične limfocitne leukemije djelujući kao promotor. Ista autorica smatra da prevencija ovakve izloženosti može smanjiti incidenciju leukemije i tumora mozga u Švedskoj za 10%. Pri ispitivanju učestalosti karcinoma u zaposlenika elektrodistribucijskih sustava Kanade i Francuske, *Thériault i suradnici* (54) zapazili su povezanost pojave akutne mijeloične leukemije i izloženosti EM zračenju izrazito niskih frekvencija, a kasnijom analizom utvrđen je i povećan rizik od karcinoma pluća pri izlaganju frekvencijski moduliranom EM zračenju frekvencije iznad 300 Hz. *Savitz i Loomis* (55) dokazali su

povećanu učestalost tumora mozga u radnika elektroprivredne industrije Sjeverne Karoline. Proučavana je i učestalost karcinoma u radnika na željeznici izloženih ELF-poljima (56, 57), ali bez konačnog zaključka.

*Kheifets i suradnici* proveli su 1995. godine metaanalizu povezanosti profesionalne izloženosti EM zračenju izrazito niskih frekvencija i tumora mozga (58). Premda su podaci o razini izloženosti, kao i o odnosu doze i učinka nepoznati, autori su utvrdili da u električara i njima sličnim zanimanjima postoji 10–20% veći rizik od pojave tumora mozga nego u ostalim zanimanjima. Metaanaliza o pojavi leukemije u istoj skupini radnika nije dokazala povezanost s profesionalnom izloženosti EM zračenjima izrazito niskih frekvencija (59). Osim karcinogenog djelovanja magnetske komponente, istraživano je i karcinogeno djelovanje električne komponente ELF-polja (60–62). Za sada nema konačnog stava o postojanju povezanosti incidencije malignoma i uvjeta profesionalne izloženosti.

Nedavna istraživanja upućuju na mogućnost povećanog rizika od pojave neurodegenerativnih bolesti kao što su Alzheimerova bolest i ostali oblici demencije (63–67) te amiotrofične lateralne skleroze (68) pri izloženosti EM zračenju izrazito niskih frekvencija na radnome mjestu (krojači, električari i slična zanimanja). Smatra se da je ovakva izloženost povezana i s pojavom fenomena »elektrosenzitivnosti«, psihičkih smetnji, poremećaja reprodukcije i kardiovaskularnih bolesti, ali su nužna daljnja istraživanja.

## LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA O NEPOSREDNIM UČINCIMA ZRAČENJA IZRAZITO NISKIH FREKVENCIJA

### *Istraživanja na dobrovoljcima*

Izloženost vremenski promjenljivom električnom polju uzrokuje promjenu električnog naboja na površini kože i vibraciju dlaka. Ovim mehanizmom većina ljudi započinje podražaj električnog polja frekvencije 50/60 Hz jakosti iznad 20 kV/m, a tek neki i jakosti ispod 5 kV/m. Pri izlaganju dobrovoljaca EM zračenju frekvencije 60 Hz, gustoće magnetskog toka od 20  $\mu$ T i jakosti 9 kV/m, nađene su neznatne promjene frekvencije srca pri mirovanju (3–5 otkucaja/min) (69, 70). Ove promjene nisu prisutne pri izlaganju jačem (12 kV/m, 30  $\mu$ T) ili slabijem polju (6 kV/m, 10  $\mu$ T), kao ni u uzbuđenih ispitanika.

Rezultati istraživanja koja su proveli *Sander i suradnici* te *Ruppe i suradnici* (u 71) pokazuju da izlaganje dobrovoljaca EM zračenju frekvencije 50/60 Hz i gustoće magnetskog toka 2–5 mT nije izazvalo promjene u krvnoj slici, parcijalnim tlakovima plinova u krvi, razini laktata, EKG i EEG nalazima, kožnoj temperaturi i vrijednostima hormona u krvi.

*Graham i suradnici* (72, 73) proveli su tri istraživanja učinka EM zračenja frekvencije 60 Hz i gustoće magnetskog toka 20  $\mu$ T na koncentraciju melatonina u serumu. Rezultati prvog istraživanja, koji su pokazivali znatan postekspozicijski pad koncentracije melatonina u serumu osoba s bazalno nižom koncentracijom od ostalih ispitanika, nisu potvrđeni. Ni *Selmaoui i suradnici* (74) nisu dokazali pad koncentracije melatonina u serumu ispitanika izloženih EM zračenju frekvencije 50 Hz i gustoće magnetskog toka od 10  $\mu$ T.



Izlaganje ELF-polju koje u tkivu inducira struju gustoće 10–40 mA/m<sup>2</sup> dovodi do promjene brzine odgovora u složenim psihološkim testovima (75, 76), kao i do pojave bljeskanja pred očima, tzv. magnetskih fosfena (77–79).

Također su mjereni vidno evocirani potencijali pri izlaganju 50/60 Hz-nim poljima različite jakosti, ali značajnije promjene nisu nađene (70, 71, 78).

#### *Istraživanja na životinjama i stanicama*

ELF-polje jakosti od 10 do 100 mV/m može nadjačati endogenu biofizikalnu »buku« u staničnoj membrani, uzrokovanu fiziološkim procesima u mozgu, živčanom tkivu i srcu (80) te izazvati morfološke i funkcionalne promjene membrane.

Neuroendokrine promjene, kao što je blokiranje sinteze melatonina u epifizi noću, potvrđene su pri izlaganju ELF-polju jakosti manje od 10 mV/m i gustoće inducirane struje do 2 mA/m<sup>2</sup> (81, 82).

Do sada su izvedena mnogobrojna istraživanja *in vitro* koja iznose podatke o učinku EM zračenja izrazito niske frekvencije na staničnu membranu, na funkciju i proliferaciju stanica (83–87). Osobitu su pozornost privukla istraživanja o učinku na transport iona kalcija kroz membranu i njegovu koncentraciju u stanici (88–90), učinku na m-RNK i sintezu proteina (91–95) te na aktivnost enzima u procesima stanične proliferacije i tumorske promocije kao što je ornitin dekarboksilaza (ODC) (96–99). Valja utvrditi reproducibilnost rezultata dosadašnjih istraživanja na staničnim kulturama, procijeniti njihovu važnost u humanoj patofiziologiji, a uočene učinke potvrditi i na animalnim modelima, kao što je slučaj s ispitivanjem ODC u štakora (100). Istraživanja o učincima na gensku ekspresiju i sintezu proteina otkrila su neke nedosljednosti u izvedbi prethodnih istraživanja (101, 102).

Iz većine istraživanja ne proizlaze dokazi da ELF-zračenje mijenja strukturu DNK i kromatina s posljedičnim mutagenim i karcinogenim djelovanjem (82, 103–105). *Lai i Singh* (106) su, međutim, koristeći se kometnim testom (engl. *comet assay*) utvrdili porast oštećenja neuronske DNK nakon dvosatne izloženosti EM zračenju frekvencije 60 Hz i gustoće magnetskog toka od 100  $\mu$ T. Nakon primjene antioksidativnih agensa, npr. melatonina, postekspozicijsko oštećenje DNK je izostalo.

Rašireno je mišljenje da se potencijalni karcinogeni učinak zračenja izrazito niskih frekvencija temelji na promotorskom mehanizmu. Poznati ili nepoznati neposredni karcinogeni agensi izaziva proces karcinogeneze, a zračenje potiče proliferaciju genetski već izmijenjenih stanica. Rezultati istraživanja na animalnim modelima razlikuju se ovisno o lokalizaciji tumora. Promotorski i kopromotorski učinak ELF-polja na karcinom kože i jetre, izazvan kemijskim karcinogenima kao inicijatorima tumorskog rasta, nije potvrđen (107–112). Međutim, istraživanja pojave karcinoma dojke u glodavaca pokazala su povezanost s izlaganjem niskofrekventom EM zračenju gustoće magnetskog toka od 0,01 do 30 mT (100, 113–117). Predložen je i patogenetski mehanizam kojim se tumači djelovanje ovakvog zračenja: inhibicija sinteze melatonina u epifizi uzrokuje povećanje sekrecije estrogena i prolaktina, s malignom proliferacijom žljezdanog epitela dojke (118, 119).

Prema mišljenju *Reitera* i drugih istraživača (120–123), EM zračenje izrazito niskih frekvencija izaziva produljenje poluživota slobodnih radikala i pad koncentracije endogenog antioksidansa melatonina u krvotoku. Posljedica toga su nepopravljiva oštećenja DNK, proteina i lipida, uz pojavu karcinoma i neurodegenerativnih bolesti.



Važan problem u istraživanjima učinaka polja izrazito niske frekvencije je procjena njihova teratogenog učinka i mogućnost izazivanja poremećaja postnatalnog razvoja. Dosadašnja istraživanja nisu potvrdila takvu povezanost (82, 85, 86, 124, 125).

## STANDARDI I MJERE ZAŠTITE

Prema općeprihvaćenoj definiciji, standardi zaštite su odredbe donesene sa svrhom osiguranja provođenja odgovarajuće zaštite pojedinca ili određenih populacijskih skupina. Standardi se propisuju kao zakonske odredbe ili donose kao neobvezujuće preporuke. Njima se određuju najviše dopustive jakosti EM zračenja na određenim mjestima, dopustiva razina izlaganja cijelog ili dijela tijela, zabrane ili ograničenja pristupa području u blizini izvora zračenja, kao i smještaj i konstrukcija izvora zračenja.

Učinci i mehanizmi interakcije zračenja izrazito niskih frekvencija s biološkim sustavom nisu dovoljno poznati. Zato se postojeći standardi često revidiraju kako bi bili usklađeni s rezultatima najnovijih znanstvenih istraživanja.

Međunarodna komisija za zaštitu od neionizirajućeg zračenja (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP*) izdala je 1998. godine preporuke o ELV-vrijednostima (engl. *exposure limit value – ELV*) pri izlaganju izvorima zračenja izrazito niskih frekvencija. Pridržavanje preporuka omogućuje odgovarajuću zaštitu od poznatih štetnih učinaka ELF-polja, ali ne i prevenciju od za sada nepotvrđenih učinaka, npr. pojave malignoma. Mnogobrojni propisani nacionalni standardi temelje se na preporukama ICNIRP-a (71).

Ove se preporuke odnose kako na profesionalnu tako i na rezidencijalnu izloženost izvorima zračenja. Profesionalno izložena populacija čini homogenu skupinu odraslih osoba izloženih zračenju pod definiranim i predvidivim uvjetima, koja je uglavnom upoznata s mogućim rizicima takvog izlaganja i odgovarajućim mjerama zaštite. Opća populacija uključuje osobe različite životne dobi i zdravstvenog stanja, uz raznolike i nepredvidive uvjete izlaganja EM zračenju. Široj javnosti uglavnom nisu poznati razmjeri i rizici izloženosti izvorima zračenja te nema mogućnosti poduzimanja mjera zaštite. Zato postoje stroži kriteriji u određivanju standarda za opću populaciju od kriterija za profesionalnu populaciju. Osobe s ugrađenim medicinskim uređajima (pacemaker, slušno pomagalo) često nisu potpuno zaštićene od pojave elektromagnetske interferencije niti pri izlaganjima koja ne prelaze okvire postojećih standarda.

Međunarodna je komisija za zaštitu od zračenja uvela dva termina u svojim preporukama; osnovna ograničenja i preporučene najviše dopustive razine izlaganja zračenju. Osnovna se ograničenja (tablica 5.) temelje na prevenciji utvrđenih štetnih učinaka na zdravlje, a izražena su u jedinicama gustoće električne struje za glavu i trup.

Preporučene najviše dopustive razine izloženosti (tablica 6.) omogućuju usporedbu osnovnih ograničenja s izmjenjenim vrijednostima ELF-polja kojima je osoba izložena. Vrijednosti preporučenih najviše dopustivih razina dobivene su na matematičkim modelima i ekstrapolacijom rezultata laboratorijskih istraživanja pod uvjetima maksimalne interakcije polja s izloženim biološkim sustavom. Pridržavanjem preporučenih najviših dopustivih razina izloženosti zračenju osigurana je i najveća zaštita.

Tablica 5. Osnovna ograničenja izloženosti izvorima zračenja izrazito niskih frekvencija (71)

Vrsta izloženosti	Frekvencijski raspon EM zračenja	Gustoća električne struje za glavu i trup (mA/m <sup>2</sup> )
Profesionalna	<1 Hz	40
	1 – 4 Hz	40/f
	4 Hz – 1 kHz	10
Opća	<1 Hz	8
	1 – 4 Hz	8/f
	4 Hz – 1 kHz	2

Tablica 6. Preporučene najviše dopustive razine izloženosti izvorima zračenja izrazito niskih frekvencija (71)

Vrsta izloženosti	Frekvencijski raspon EM zračenja	Jakost električnog polja (V/m)	Jakost magnetskog polja (A/m)	Magnetska indukcija (μT)
Profesionalna	<1 Hz	–	1,63x10 <sup>5</sup>	2x10 <sup>5</sup>
	1 – 8 Hz	20000	1,63x10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup>	2x10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup>
	8 – 25 Hz	20000	2x10 <sup>4</sup> /f	2,5x10 <sup>4</sup> /f
	>25 Hz	500/f	20/f	25/f
Opća	<1 Hz	–	3,2x10 <sup>4</sup>	4x10 <sup>4</sup>
	1 – 8 Hz	10000	3,2x10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>	4x10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>
	8 – 25 Hz	10000	4000/f	5000/f
	>25 Hz	250/f	4/f	5/f

Prema postojećim standardima i znanju o učincima zračenja izrazito niskih frekvencija poduzimaju se određene mjere zaštite opće i profesionalno izložene populacije. Opća populacija uglavnom nije izložena poljima velikih gustoća snage, jer je pristup takvim izvorima zabranjen. Žičana ograda i drugi metalni objekti u blizini visokonaponskih dalekovoda moraju biti uzemljeni zbog opasnosti od strujnog udara. Proizvođačima medicinskih uređaja preporučena je izrada uređaja manje osjetljivosti na elektromagnetsku interferenciju. Istovremeno je osobama s ugrađenim medicinskim uređajima ograničen pristup u područja elektromagnetskih polja velikih gustoća snage sa znakovima upozorenja na ulazu u takve zone.

Profesionalno izložena populacija može biti zaštićena tehničkim, administrativnim i osobnim mjerama zaštite. Odgovarajuća konstrukcija izvora smanjuje emisiju zračenja u okolinu. Pristup se izvorima zračenja ograničava na što manji broj osoblja. Nužna je i edukacija radnika o učincima izloženosti izvorima zračenja, mjerama i pravilima zaštite na radu.

Uz provođenje mjera zaštite potrebno je uvesti standardizirane postupke mjerenja zračenja – dozimetriju, kao i kontrolu provođenja mjera zaštite profesionalne i opće populacije.

## LITERATURA

1. International Labour Organization (ILO). Occupational hazards from non-ionizing electromagnetic radiation. Occupational Safety and Health Series No. 53. Geneva: International Labour Office; 1985.
2. Valberg PA, Kavet R, Rafferty CN. Can low-level 50/60 Hz electric and magnetic fields cause biological effects? *Radiat Res* 1997;148:2–21.
3. National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS). EMF RAPID (Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination Program). 15. lipnja 1999. [pristup 29. prosinca 1999.]. Dostupno na: URL:<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/home.htm>
4. Gamulin S, Marušić M, Krvavica S i sur. Patofiziologija. 3. izdanje. Zagreb: Medicinska naklada; 1995. str. 9.
5. World Health Organization (WHO). International EMF Project. 10. studenoga 1999. [pristup 29. prosinca 1999.]. Dostupno na: URL:<http://www.who.int/peh-emf/>
6. European Commission. COST Action 244bis: Biomedical Effects of Electromagnetic Fields. 28. svibnja 1999. [pristup 29. prosinca 1999.]. Dostupno na: URL:<http://www.radio.fer.hr/cost244/>
7. International Labour Organization (ILO). Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields: A practical guide. Occupational Safety and Health Series No. 69. Geneva: International Labour Office; 1994.
8. Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979;109:273–84.
9. Fulton JP, Cobb S, Preble L, Leone L, Forman E. Electrical wiring configuration and childhood leukemia in Rhode Island. *Am J Epidemiol* 1980;111:292–6.
10. Tomenius L. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics* 1986;7:191–207.
11. Savitz DA, Wachtel H, Barnes FA, John EM, Tvrdik JG. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am J Epidemiol* 1988;128:21–38.
12. Coleman MP, Bell CMJ, Taylor HL, Primic-Zakelj M. Leukemia and residence near electricity transmission equipment: a case-control study. *Br J Cancer* 1989;60:793–8.
13. Myres A, Clayden AD, Cartwright RA, Cartwright SC. Childhood cancer and overhead power-lines: a case-control study. *Br J Cancer* 1990;62:1008–14.
14. London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sobel E, Cheng TC, Peters JM. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol* 1991;134:923–37.
15. Lowenthal RM, Panton JB, Baikie MJ, Lickiss JN. Exposure of high-tension power lines and childhood leukemia: a pilot study [pismo]. *Med J Aust* 1991;155:347.
16. Feychting M, Ahlbom A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high voltage power lines. *Am J Epidemiol* 1993;138:467–81.
17. Olsen JH, Nielsen A, Schulgen G. Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. *BMJ* 1993;307:891–5.
18. Verkasalo PK, Pukkala E, Hongisto MY, Valjus JE, Jarvinen PJ, Heikkilä KV i sur. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *BMJ* 1993;307:895–9.
19. Petridou E, Hsieh CC, Skaldikas Y, Toupadaki N, Athanassopoulos Y. Suggestion of concomitant changes of electric power consumption and childhood leukemia in Greece. *Scand J Soc Med* 1993;21:281–5.
20. Michaelis J, Shüz J, Meinert R, Menger M, Grigat JP, Kaatsch P i sur. Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes Control* 1997;8:167–74.
21. Linet MS, Hatch EE, Kleinerman RA i sur. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *N Eng J Med* 1997;337:1–7.
22. Tynes T, Haldorsen T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am J Epidemiol* 1997;145:219–26.
23. Preston-Martin S, Gurney JG, Pogoda JM, Holly EA, Mueller BA. Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters: results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. *Am J Epidemiol* 1996;143:1116–22.

24. Savitz DA, John EM, Kleckner RC. Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1990;131:763-73.
25. Wertheimer N, Leeper E. Adult cancer related to electrical wires near the home. *Int J Epidemiol* 1982;11:345-55.
26. McDowall M. Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br J Cancer* 1986;53:271-9.
27. Severson RK, Stevens RG, Kaune WT, Thomas DB, Heuser L, Davis S i sur. Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am J Epidemiol* 1988;128:10-20.
28. Youngson JH, Clayden AD, Myres A, Cartwright RA. A case-control study of adult hematological malignancies in relation to overhead powerlines. *Br J Cancer* 1991;63:977-85.
29. Eriksson M, Karlsson M. Occupational and other environmental factors and multiple myeloma: a population based case-control study. *Br J Ind Med* 1992;49:95-103.
30. Schreiber GH, Swaen GM, Meijers JM, Slangen JJ, Sturmans F. Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *Int J Epidemiol* 1993;22:9-15.
31. Feychting M, Ahlbom A. Magnetic fields, leukemia, and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology* 1994;5:501-9.
32. Verkasalo PK, Pukkala E, Kaprio J, Heikkilä KV, Koskenvuo M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *BMJ* 1996;313:1047-51.
33. Vena JE, Graham S, Hellman R, Swanson M, Brasure J. Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer. *Am J Epidemiol* 1991;134:180-5.
34. Vena JE, Freudenheim JL, Marshall JR, Laughlin R, Swanson M, Graham S. Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am J Epidemiol* 1994;140:974-9.
35. Preston-Martin S, Peters JM, Yu MC, Garabrant DH, Bowman JD. Myelogenous leukemia and electric blanket use. *Bioelectromagnetics* 1988;9:207-13.
36. Lovely RH, Buschbom RL, Slavich AL, Anderson LE, Hansen NH, Wilson BW. Adult leukemia risk and personal appliance use: a preliminary study. *Am J Epidemiol* 1994;140:510-7.
37. Verreault R, Weiss NS, Hollenbach KA, Strader CH, Daling JR. Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am J Epidemiol* 1990;131:759-62.
38. Asanova TP, Rakov AN. Sostoianie zdorov'ia rabotaiushchikh v elektricheskome pole otkrytykh raspredelitel'nykh ustroystv 400-500 kV (Predvaritel'noe soobshchenie) [Health conditions of workers exposed to electric fields of open switchboard installations of 400-500 kV (Preliminary report), in Russian]. *Gig Tr Prof Zabol* 1966;10:50-2.
39. Sazanova TE. Physiological effects of work in the vicinity of 400-500 kV outdoor installations. Moskva: Institute of Labor Protection of All-Union Central Council of Trade Unions; 1967. str. 34-49. Izvještaj br.: 46.
40. Milham S, Jr. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields [pismo]. *N Eng J Med* 1982;307:249.
41. Savitz DA, Ahlbom A. Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. U: Carpenter DA, Ayrapetyan S, urednici. *Biologic effects of electric and magnetic fields*, New York: Academic Press; 1992. str. 233-62.
42. London SJ, Bowman JD, Sobel E, Thomas DC, Garabrant DH, Pearce N i sur. Exposure to magnetic fields among electrical workers in relation to leukemia risk in Los Angeles County. *Am J Ind Med* 1994;26:47-60.
43. Loomis DP, Savitz DA. Mortality from brain cancer and leukemia among electrical workers. *Br J Ind Med* 1990;47:633-8.
44. Harrington JM, McBride DI, Sorahan T, Paddle GM, van Tongeren M. Occupational exposure to magnetic fields in relation to mortality from brain cancer among electricity generation and transmission workers. *Occup Environ Med* 1997;54:7-13.
45. Tynes T, Andersen A. Electromagnetic fields and male breast cancer [pismo]. *Lancet* 1990;336:1596.
46. Matanoski GM, Breyse PN, Elliott EA. Electromagnetic field exposure and male breast cancer [pismo]. *Lancet* 1991;337:737.

47. Demers PA, Thomas DB, Rosenblatt KA i sur. Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am J Epidemiol* 1991;134:340–7.
48. Loomis DP. Cancer of breast among men in electrical occupations [pismo]. *Lancet* 1992;339:1482–3.
49. Tynes T, Andersen A, Langmark F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am J Epidemiol* 1992;136:81–8.
50. Guénel P, Raskmark P, Andersen JB, Lynge E. Incidence of cancer in persons with occupational exposure to electromagnetic fields in Denmark. *Br J Ind Med* 1993;50:758–64.
51. Loomis DP, Savitz DA, Ananth CV. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J Natl Cancer Inst* 1994;86:921–5.
52. Sahl JD, Kelsh MA, Greenland S. Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among electric utility workers. *Epidemiology* 1993;4:104–14.
53. Floderus B, Persson T, Stenlund C, Wennberg A, Ost A, Knave B. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Causes Control* 1993;4:465–76.
54. Thériault G, Goldberg M, Miller AB i sur. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France 1970–1989. *Am J Epidemiol* 1994;139:550–72.
55. Savitz DA, Loomis DP. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol* 1995;141:123–34.
56. Alfredsson L, Hammar N, Karlehagen S. Cancer incidence among male railway engine-drivers and conductors in Sweden, 1976–90. *Cancer Causes Control* 1996;7:377–81.
57. Floderus B, Tornqvist S, Stenlund C. Incidence of selected cancers in Swedish railway workers, 1961–79. *Cancer Causes Control* 1994;5:189–94.
58. Kheifets LI, Afifi AA, Buffler PA, Zhang ZW. Occupational electric and magnetic field exposure and brain cancer: a meta-analysis. *J Occup Environ Med* 1995;37:1327–41.
59. Kheifets LI, Afifi AA, Buffler PA, Zhang ZW, Matkin CC. Occupational electric and magnetic field exposure and leukemia. A meta-analysis. *J Occup Environ Med* 1997;39:1074–91.
60. Miller AB, To T, Agnew DA, Wall C, Green LM. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am J Epidemiol* 1996;144:150–60.
61. Guénel P, Nicolau J, Imbernon E, Chevalier A, Goldberg M. Exposure to 50-Hz electric field and incidence of leukemia, brain tumors, and other cancer among French electric utility workers. *Am J Epidemiol* 1996;144:1107–21.
62. Baris D, Armstrong BG, Deadman J, Thériault G. A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occup Environ Med* 1996;53:25–31.
63. Sobel E, Davanipour Z. EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology* 1996;47:1594–600.
64. Sobel E, Dunn M, Davanipour Z, Qian Z, Chui HC. Elevated risk of Alzheimer's disease among workers with likely electromagnetic field exposure. *Neurology* 1996;47:1477–81.
65. Feychting M, Pedersen NL, Svedberg P, Floderus B, Gatz M. Dementia and occupational exposure to magnetic fields. *Scand J Work Environ Health* 1998;24:46–53.
66. Savitz DA, Checkoway H, Loomis DP. Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. *Epidemiology* 1998;9:398–404.
67. Savitz DA, Loomis DP, Tse CK. Electrical occupations and neurodegenerative disease: analysis of US mortality data. *Arch Environ Health* 1998;53:71–4.
68. Davanipour Z, Sobel E, Bowman JD, Qian Z, Will AD. Amyotrophic lateral sclerosis and occupational exposure to electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1997;18:28–35.
69. Cook MR, Graham C, Cohen HD, Gerkovich MM. A replication study of human exposure to 60-Hz fields: effects on neurobehavioral measures. *Bioelectromagnetics* 1992;13:261–85.
70. Graham C, Cook MR, Cohen HD, Gerkovich MM. Dose response study of human exposure to 60 Hz electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1994;15:447–63.

71. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 1998;74:494–522.
72. Graham C, Cook MR, Riffle DW, Gerkovich MM, Cohen HD. Nocturnal melatonin levels in human volunteers exposed to intermittent 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1996;17:263–73.
73. Graham C, Cook MR, Riffle DW. Human melatonin during continuous magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 1997;18:166–71.
74. Selmaoui B, Lambrozo J, Touitou Y. Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci* 1996;58:1539–49.
75. Stollery BT. Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br J Ind Med* 1986;43:339–49.
76. Stollery BT. Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br J Ind Med* 1987;44:111–8.
77. Lövsund P, Öberg P, Nilsson SEG. Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. *Med Biol Eng Comput* 1980;18:758–64.
78. Silny J. The influence threshold of time-varying magnetic field in human organism. U: Bernhardt JH, urednici. *Biological effects of static and extremely low frequency magnetic fields*. München: MMV Medizin Verlag; 1986. str. 105–12.
79. Tenforde TS. Biological interaction and human health effects of extremely low frequency magnetic fields. U: Anderson LE, Stevens RG, Wilson BW, ur. *Extremely low-frequency electromagnetic fields: the question of cancer*. Columbia (OH): Battelle Press; 1990. str. 291–315.
80. Astumian RD, Weaver JC, Adair RK. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS* 1995;92:3740–3.
81. Tenforde TS. Biological interactions of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem Bioenerg* 1991;25:1–17.
82. Tenforde TS. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. U: Polk C, Postow E, urednici. *Biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton (FL): CRC Press; 1996. str. 185–230.
83. Sienkiewicz ZJ, Saunders RD, Kowalczyk CI. The biological effects of exposure to non-ionizing electromagnetic fields and radiation: II. Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton (UK): National Radiological Protection Board; 1991. Izveštaj br.: NRPB R239.
84. Tenforde TS. Cellular and molecular pathways of extremely low frequency electromagnetic field interactions with living systems. U: Blank M, ur. *Electricity and magnetism in biology and medicine*. San Francisco (CA): San Francisco Press, 1993. str. 1–8.
85. Cridland NA. Electromagnetic fields and cancer: a review of relevant cellular studies. Chilton (UK): National Radiological Protection Board; 1993. Izveštaj br.: NRPB-R256.
86. Sienkiewicz ZJ, Cridland NA, Kowalczyk CI, Saunders RD. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. U: Stone WR, Hyde G, urednici. *The review of radio science: 1990–1992*. Oxford (UK): Oxford University Press, 1993;737–70.
87. Tenforde TS. Biological interactions and potential health effects of extremely low frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Annu Rev Public Health* 1992;13:173–96.
88. Walieczech J, Liburdy RP. Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances  $^{45}\text{Ca}^{2+}$  uptake in rat thymocytes: dependence on mitogen activation. *FEBS Lett* 1990;271:157–60.
89. Liburdy RP. Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann N Y Acad Sci* 1992;649:74–95.
90. Walieczech J. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: the role of calcium signaling. *FASEB J* 1992;6:3177–85.
91. Goodman R, Bassett CA, Henderson AS. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science* 1983;220:1283–5.
92. Goodman R, Henderson AS. Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1988;85:3928–32.



93. Goodman R, Henderson AS. Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Bioelectrochem Bioenerg* 1991;25:335–55.
94. Greene JJ, Skowronski WJ, Mullins JM, Nardone RM. Delineation of electric and magnetic field effects of extremely low frequency electromagnetic radiation on transcription. *Biochem Biophys Res Commun* 1991;174:742–9.
95. Phillips JL, Haggren W, Thomas WJ, Ishida-Jones T, Adey WR. Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. *Biochim Biophys Acta* 1992;1132:140–4.
96. Byus CV, Pieper SE, Adey WR. The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis* 1987;8:1385–9.
97. Byus CV, Kartun K, Pieper S, Adey WR. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res* 1988;48:4222–6.
98. Litovitz TA, Krause D, Mullins JM. Effects of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem Biophys Res Commun* 1991;178:862–5.
99. Litovitz TA, Krause D, Penafiel M, Elson EC, Mullins JM. The role of coherence time in the effects of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics* 1993;14:395–403.
100. Mevissen M, Kietzmann M, Löscher W. In vivo exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Lett* 1995;90:207–14.
101. Lacy-Hulbert A, Wilkins RC, Hesketh TR, Metcalfe JC. No effects of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Radiat Res* 1995;144:9–17.
102. Saffer JD, Thurston SJ. Cancer risk and electromagnetic fields [pismo]. *Nature* 1995;375:22–3.
103. National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionizing Radiation. Chilton (UK): National Radiological Protection Board; 1992. Dokumenti NRPB 3(1).
104. Murphy JC, Kaden DA, Warren J, Sivak A. Power frequency electric and magnetic fields: a review of genetic toxicology. *Mutat Res* 1993;296:221–40.
105. McCann J, Dietrich F, Rafferty C, Martin A. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutat Res* 1993;297:61–95.
106. Lai H, Singh NP. Melatonin and N-tert-butyl-alpha-phenylnitron block 60 Hz magnetic field-induced DNA single and double strand breaks in rat brain cells. *J Pineal Res* 1997;22:152–62.
107. McLean J, Stuchly MA, Mitchel RE, et al. Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics* 1991;12:273–87.
108. Rannung A, Ekström T, Mild KH, Holmberg B, Gimenez-Conti I, Slaga TJ. A study on skin tumor formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure. *Carcinogenesis* 1993;14:573–8.
109. Rannung A, Holmberg B, Ekström T, Mild KH, Gimenez-Conti I, Slaga TJ. Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumor promotion in Sencar Mice. *Carcinogenesis* 1994;15:153–7.
110. Stuchly MA, McLean JRN, Burnett R, Goddard M, Lecuyer DW, Mitchel REJ. Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Lett* 1992;65:1–7.
111. Rannung A, Holmberg B, Ekström T, Mild KH. Rat liver foci study on coexposure with 50 Hz magnetic fields and known carcinogens. *Bioelectromagnetics* 1993;14:17–27.
112. Rannung A, Holmberg B, Mild KH. A rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. *Environ Res* 1993;62:223–9.
113. Beniashvili DS, Bilanishvili VG, Menabde MZ. The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr Onkol* 1991;37:937–41.
114. Löscher W, Mevissen M, Lehmacher W, Stamm A. Tumor promotion in breast cancer model by exposure to weak alternating magnetic field. *Cancer Lett* 1993;71:75–81.
115. Mevissen M, Stamm A, Buntenkötter S, Zwingelberg R, Wahnschaffe U, Löscher W. Effects of magnetic field increases on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics* 1993;14:131–43.
116. Baum A, Mevissen M, Kamino K, Mohr U, Löscher W. A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100  $\mu$ T magnetic field exposure. *Carcinogenesis* 1995;16:119–25.



117. Löscher W, Mevissen M. Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effects of prolonging magnetic exposure in breast cancer model. *Cancer Lett* 1995;96:175-80.
118. Stevens RG. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am J Epidemiol* 1987;125:556-61.
119. Stevens RG, Davis S, Thomas DB, Anderson LE, Wilson BW. Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *FASEB J* 1992;6:853-60.
120. Reiter RJ, Richardson BA. Magnetic field effects on pineal indoleamine metabolism and possible biological consequences. *FASEB J* 1992;6:2283-7.
121. Reiter RJ. Static and extremely low frequency electromagnetic field exposure: reported effects on circadian production of melatonin. *J Cell Biochem* 1993;51:394-403.
122. Reiter RJ: Melatonin aspects of exposure to low frequency electric and magnetic fields. U: Lin JC, urednik. *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems*. Vol 2. New York (NY): New York Plenum; 1997. str. 1-27.
123. Grissom CB. Magnetic field effects in biology: a survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination. *Chem Rev* 1996;95:3-28.
124. Chernoff N, Rogers JM, Kavet R. A review of the literature on potential reproductive and development toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology* 1992;74:91-126.
125. Brent RL, Beckmann DA, Landel CP. Clinical teratology. *Curr Opin Pediatr* 1993;5:201-11.

### *Summary*

## BIOEFFECTS OF NONIONISING RADIATION: EXTREMELY LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

This article reviews various studies on effects of electric and magnetic fields of extremely low frequencies on human health and gives an overview of residential and occupational exposure to different sources, currently established exposure limitations, and protection measures.

Throughout the evolution biological systems adapted to natural electric and magnetic fields. Only hundred years ago human exposure to radiation was limited to electric and magnetic fields arising either from extraterrestrial or terrestrial sources, yet both natural. For the past fifty years there has been large growth of artificial sources of electric and magnetic fields, especially with frequencies of 50 and 60 Hz (power generating and distribution systems). The concern about long-term exposure to artificial fields and possible adverse effects on human health has been entirely justified and led to numerous intensive epidemiological and laboratory studies. Results of several epidemiological studies confirm the connection between exposure to electric and magnetic fields of extremely low frequencies (up to 300 Hz) and increased risk of leukemia and brain tumor in children and adults. In addition, the risk of breast cancer in occupationally exposed population has increased. Laboratory studies on animal models, in vitro systems, and human volunteers did not confirm this connection. There is a growing interest in investigation of other possible adverse health effects such as neurodegenerative diseases (Alzheimer's disease and other forms of dementia, amyotrophic lateral sclerosis), cardiovascular disorders (arrhythmias and acute myocardial infarction), psychiatric disorders, and electrosensitivity.

#### *Key words:*

ELF fields, epidemiological studies, laboratory studies, occupational exposure, residential exposure

### Requests for reprints:

Ivana Bušljeta, dr. med.  
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada  
p.p. 291, 10001 Zagreb  
E-mail: [Ivana.Busljeta@imi.hr](mailto:Ivana.Busljeta@imi.hr)